心理科学进展 2022, Vol. 30, No. 3, 623–634
Advances in Psychological Science

https://doi.org/10.3724/SP.J.1042.2022.00623

儿童的人际运动同步*

张琳琳 [1,2] 魏坤琳 [3] 李 晶 [1,2]

([1] 中国科学院行为科学重点实验室，中国科学院心理研究所，北京 100101)
([2] 中国科学院大学心理学系，北京 100049) ([3] 北京大学心理与认知科学学院，北京 100080)

摘 要 人际运动同步是一种“社会胶粘剂”，能促进儿童产生更多的亲社会行为。儿童的人际运动同步能力随着年龄的增长不断提升，其同步表现受到运动方式、节奏刺激类型、同步对象等因素影响。在人际运动同步过程中，时间感知、运动计划和运动执行三大认知因素参与其中，既制约着个体同步能力的发展，也影响个体同步的表现。孤独症作为一种神经发育性障碍，孤独症儿童表现出异常的人际运动同步。未来的研究不仅要探讨孤独症儿童人际运动同步的异常机制，还要更多关注人际运动同步训练在孤独症群体中的实际应用和干预效果。

关键词 人际运动同步，亲社会行为，认知机制，孤独症
分类号 B844

1 引言

人际运动同步(interpersonal motor synchronization)是指两人或者多人在互动的过程中，动作同时发生并保持一致的现象(Bernieri et al., 1988)。它普遍存在于各种社会情境中，例如阅兵方阵整齐划一地齐步走，聚光灯下舞者集体翩翩起舞，以及齐声朗诵、集体合唱等等。虽然与他人的动作保持同步看起来稀疏平常，但真正完成人际运动同步既要感知他人的动作，同时还要在空间和时间上协调自己的动作保持同步，整个过程需要精确的时间感知能力、精准的运动计划和执行能力(Dahan et al., 2016; Hoehl et al., 2021; Konvalinka et al., 2010; Mills et al., 2019)，并非一件易事。特别是对于婴幼儿来说，要做到人际运动同步需要相当长的发展历程(Repp & Su, 2013)。

近些年来，人际运动同步是一个非常热门的研究课题，引发了音乐认知、社会心理学、发展心理学、认知神经科学等领域研究者的广泛关注(Kragness & Cirelli, 2021)。其中一个重要原因是人际运动同步能够促进亲社会行为。既往成人研究发现各种各样的人际运动同步(如同步按键、同步击鼓、齐步走、跳舞等)都会促进亲社会性(Cirelli, 2018; Macpherson et al., 2020; Mogan et al., 2017; Rauchbauer & Grosbras, 2020; Rennung & Göritz, 2016)，例如能增加参与者的亲密感(Tarr et al., 2016)、信任感(Launay et al., 2013)和合作性行为(Reddish et al., 2013; Wiltermuth & Heath, 2009)等。这一结果在儿童身上也同样得到验证。有研究发现，12 个月大的婴儿在摇椅子时，相较于异步摇晃，他们更喜欢同步摇晃的社交伙伴(Tunçgenç et al., 2015)；14 个月大的婴儿随着音乐与实验人员同步弹跳或者异步弹跳时，同步组的婴儿对实验人员表现出更多的助人行为(Cirelli et al., 2014)；研究还发现短时间的同步击鼓可以增强 4 岁儿童与同伴之间的合作(Rabinowitch & Meltzoff, 2017)，增进 8~9 岁儿童之间的亲密感和相似感(Rabinowitch & Knafo-Noam, 2015)。总之，人际运动同步为儿童的成长与发展带来了积极的亲社会效应。

该领域的研究主要集中在揭示人际运动同步促进亲社会行为的原因上(Feniger-Schaal et al., 2021; Vicaria & Dickens, 2016)，已有研究者分别从社会认知、神经生理和演化心理学等角度给出理论解释。例如，社会认知理论认为，人际运动同

收稿日期：2021-04-13
* 国家自然科学基金项目(31971009)，国家自然科学基金项目(32071047)和中国科学院青年创新促进会资助。
通信作者：李晶, E-mail: lij@psych.ac.cn

步的积极结果可能与自我−他人边界模糊有关(Cross et al., 2019; Valdesolo & Desteno, 2011)。神经生理学理论认为, 人际运动同步与脑间同步、内啡肽和催产素的释放有关(Hu et al., 2017; Launay et al., 2016; Shamay-Tsoory et al., 2019)。演化心理学认为, 同步化运动增强了团体之间的联系, 从而促进群体合作(Brown, 2000; Hagen & Bryant, 2003; Reddish et al., 2013)。但目前这些机制探讨大多集中在成人身上, 尚缺乏对儿童人际运动同步的系统探究, 特别是儿童人际运动同步的发展轨迹及其特点并不清楚, 儿童人际运动同步的影响因素以及同步过程中的认知成分缺乏系统梳理。

本文将从三个方面来总结儿童人际运动同步领域的研究成果。首先, 本文将阐述儿童同步能力的发展过程; 其次, 将梳理影响儿童人际运动同步绩效的因素, 包括运动方式(手指、头、脚等)、节奏刺激类型(如视觉刺激、听觉刺激)和同步对象(如机器人、成人、儿童)等实验操控条件的影响, 以及时间感知、运动计划和运动执行三大认知因素的制约。最后, 将探讨神经发育性障碍的特殊群体——孤独症儿童的人际运动同步的特点及制约因素。由于社会互动缺陷和沟通障碍是孤独症儿童的核心症状, 因此其人际运动同步的发展轨迹存在一些特异性表现, 理清孤独症儿童与健康儿童在人际运动同步行为中的异同不仅能够帮助我们理解儿童人际运动同步的发展轨迹, 同时还对人际运动同步在孤独症儿童中的实际应用和干预效果具有启发意义。

2 儿童同步能力的发展过程

2.1 儿童同步化运动的先决条件及其发展

节奏感知能力是儿童完成人际运动同步的先决条件(Trainor & Cirelli, 2015), 它的发展可以追溯到婴儿早期。有研究发现, 2 个月大的婴儿就能识别出简单节奏中的速度变化(Baruch & Drake, 1997)。当音乐节拍发生变化(从两拍变成三拍或者从三拍变为两拍)时, 7 个月大的婴儿会表现出惊讶(Hannon & Johnson, 2005)。

尽管人类在婴儿早期就获得了一定的节奏感知能力, 但要将节奏与动作完美同步在一起, 还需要漫长的时间。例如, 5 个月大的婴儿, 开始出现跟随外部节奏刺激晃动身体的迹象(Zentner & Eerola, 2010); 但 2 岁的婴幼儿仍然无法做到与外部刺激同步(Zentner & Eerola, 2010); 直到 4 岁, 儿童才能够对动作简单并且节奏速度在其能力范围之内(300~400 ms)的外部节奏保持同步(Provasi & Bobin-Bègue, 2003; Rose, 2016)。有横向研究(4~95 岁)表明, 儿童 6~7 岁时同步的准确性和稳定性有很大提升, 同步能力大致与成人相当(McAuley et al., 2006; Repp & Su, 2013)。随着年龄的增长, 儿童的同步能力不断增强, 同步行为的稳定性和准确性都逐渐提高(Clizbe & Getchell, 2010; Drake et al., 2000; Fitzpatrick et al., 1996; Getchell, 2007; McAuley et al., 2006)。

综上所述, 婴儿早期出现、幼儿期发展得更精准的节奏感知能力, 以及幼儿期才发展的动作与节奏同步能力, 共同为儿童人际运动同步的发展奠定了基础(Trainor & Cirelli, 2015)。

2.2 儿童人际运动同步的发展轨迹

目前儿童运动同步的前期研究主要集中在儿童如何与外部刺激同步, 而少有研究探讨儿童人际运动同步。实际上, 人类在儿童早期就会呈现自发性的人际运动同步行为(Cuadros et al., 2020)。例如当同伴在一旁击鼓时, 2 岁儿童会自发地跟随对方开始击鼓或者停止击鼓(Endedijk et al., 2015)。当主试要求 2.5 岁的儿童分别跟随节拍器、动态活动的击鼓机以及成人同步敲鼓时, 如果外部节奏速度比儿童内在自发速度(400 ms)更慢, 儿童只有在与成人同步击鼓的条件下才会自发地调整其敲击速度。而在另外两种非人际的条件下(节拍器、击鼓机), 儿童无法根据节奏变化调整其速度(Kirschner & Tomasello, 2009)。这表明, 相较于单纯的外部刺激同步, 人际运动同步对儿童来说可能更容易。

然而有研究者发现, 儿童 3 岁时在联合任务中表现出人际与非人际相当的协调水平(Endedijk et al., 2015; Meyer et al., 2010)。研究者让 2.5 岁和 3 岁的儿童做一个连续按键任务, 该任务有单独按键、与实验人员一起联合按键两个条件。结果发现, 3 岁儿童无论是单独按键还是联合按键, 其行为表现相差无几; 但 2.5 岁儿童与成人一起按键时, 他们的按键准确率比单独按键时更低(Meyer et al., 2010)。

综上所述, 儿童 2 岁就呈现出自发的人际运动同步, 直到 3 岁才表现出人际和非人际相当的

协调水平。

3　儿童人际运动同步的影响因素

在实验室情境下，儿童人际运动同步常用的任务有弹跳(bouncing)、手指打节拍(tapping)、拍手(clapping)、敲鼓(drumming)、摇椅子(rocking)、荡秋千(swing)、行进(marching)等。在此过程中，儿童的同步表现会受到两大层面的影响。第一层面是实验操控条件的影响，包括运动方式、节奏刺激类型和同步对象；第二层面是同步运动背后认知因素的制约，包括时间感知、运动计划和运动执行。

3.1　实验操控条件的影响

根据实验目的，研究者在实验过程中会操纵不同的变量，如运动方式(手指、头、脚等)、节奏刺激类型(如听觉、视觉、触觉等)、同步对象(机器人、成人、儿童等)，来探究儿童人际运动同步的影响因素。

3.1.1　运动方式的影响

由于实验任务的不同，被试使用的身体部位也各不相同。有研究认为儿童之所以无法达到与成人相当的同步水平，很大可能是因为运动能力没有完全发育好(Trainor & Cirelli, 2015)。而成人研究发现运动方式对同步表现确实存在影响。有研究比较了成人的手和脚(Aschersleben & Prinz, 1995; Fujii et al., 2011)、手指和鼓槌(Madison et al., 2013; Manning et al., 2016)、优势手和非优势手(Lorås et al., 2012; Studenka & Zelaznik, 2008)、拍手和弹跳(Tranchant et al., 2016)、点头和手指以及脚(潘禄，2016)等不同效应器对运动同步的影响，结果发现敲击鼓槌比敲击手指更稳定(Madison et al., 2013; Manning et al., 2016)，优势手的同步表现要优于非优势手(Lorås et al., 2012; Studenka & Zelaznik, 2008)，拍手比弹跳的同步准确性更高(Tranchant et al., 2016)，点头对于同步化的促进效果最强，手指打节拍次之，用脚打拍子最弱(潘禄，2016)。由于各个身体部位的物理特性(如质量大小和质量分布)不同，因此在使用这些部位做节奏性运动时，其固有频率也各不相同。有研究发现质量较大的效应器(如躯干和腿)倾向于与较慢的节奏速度同步，而质量较小的效应器(如手指)倾向于与较快的节奏速度同步(Toiviainen et al., 2010)。还有研究认为运动所需的力量越小，同步运动的稳定性越高(Carson et al., 2009)，例如弹跳需要在运动过程中对抗重力的影响，因此同步的稳定性差(Tranchant et al., 2016)。此外，动作的复杂性、运动过程中是否需要协调身体的各个关节和部位等都对同步表现产生一定影响(Manning et al., 2016)。

运动方式对同步化运动的影响在儿童行为研究中也得到了证实。有研究要求 4.5~6.5 岁的儿童用 6 种方式做节奏性同步运动，分别是优势手或非优势手单手拍膝盖，双手同时或交替拍膝盖，坐姿或站姿状态下双脚交替打节拍。结果发现优势手的同步表现要优于非优势手，双手交替拍膝盖要比双手同时拍膝盖、坐姿状态下双脚交替打节拍的同步准确性更高；对比双脚交替打节拍，儿童站姿下的同步准确性要高于坐姿(Tsapakidou et al., 2001)。因此运动方式是儿童人际同步行为表现的一个潜在影响因素。

3.1.2　节奏刺激类型的影响

除了运动方式，同步化运动还会受到节奏刺激类型的影响。在早期成人研究中发现，相较于和具有一定节奏属性的视觉闪光同步，与听觉节奏刺激同步的稳定性更高(Glenberg et al., 1989)。当同时呈现听觉和视觉两种节奏刺激时，听觉刺激的竞争力更强(Aschersleben & Bertelson, 2003)，例如当被试在跟随视觉闪光同步时，播放干扰声音，被试更容易被干扰声音吸引，并跟随声音刺激按键反应(Repp & Penel, 2004)。Hove 等人的多项研究表明，与声音刺激相比，当引入动态型的视觉刺激(如上下运动或者旋转运动的横条、手指运动的动态图片和渐入渐出的雪花动态效果)作为同步化运动的刺激线索时，被试在与声音刺激同步时表现最好，其次是手指动态图片和上下运动或旋转运动的横条，闪光和雪花动态效果最差(Hove et al., 2007; Hove & Risen, 2009; Hove et al., 2010)。

在儿童运动同步过程中，听觉和动态节奏刺激显示出类似的优势。在一项针对 6~7 岁儿童的节奏按键实验中，儿童分别跟随声音、闪光、弹跳小球三种节奏刺激类型做按键反应。结果发现，儿童在声音节奏刺激中的同步表现最好，其次是弹跳小球，闪光的同步表现最差(Mu et al., 2018)。

3.1.3　同步对象的影响

儿童人际运动同步所指向的对象(如机器人、同龄伙伴和成人)对儿童的同步表现也存在影响。有研究显示 2.5 岁的儿童分别跟随动态的击鼓机和成人同步击鼓时，如果节奏速度为 600 ms (该

速度比儿童内在自发速度 400 ms 更慢)，在与成人同步击鼓的情况下，儿童能够自发的调整其敲击速度。但当对面是击鼓机时，儿童则没有显示出调整的迹象(Kirschner & Tomasello, 2009)。类似的，如果对面的成人是儿童的母亲，即使是 1.5 岁的儿童，在节奏速度为 600 ms 时，也会显示出自发调整速度的迹象；但如果对面是击鼓机的话，则没有调整的迹象(Yu & Myowa, 2021)。这说明人际运动同步有积极的社会伙伴效应，与最亲密的照顾者进行同步化运动，对儿童的同步表现促进效果最大(Yu & Myowa, 2021)。

有研究发现同龄伙伴和成人对儿童同步表现的影响程度存在不同。当 5~12 岁的儿童组成同龄或者混龄的二人组同步敲鼓时，他们同步的准确率都比和成人一起敲鼓时更小(Kleinspehn-Ammerlahn et al., 2011)。这说明同步对象动作的熟练程度和精确程度，对儿童的同步化行为有显著影响。由于成人的动作更精确、更具可预测性，且能够适应儿童动作的不稳定，从而使得成人和儿童之间的同步效果更好(Endedijk et al., 2015)。

综上，儿童在人际运动同步过程中所采取的运动方式、跟随的节奏刺激类型以及面对的同步对象都会影响儿童的同步表现。

3.2 同步运动背后认知因素的制约

除了实验操控条件的影响，儿童人际同步运动还受到背后认知因素的制约。人际运动同步过程中，个体需要从环境和同伴那里获得线索，形成节奏感知和时间感知；此外还需要计划自身的动作，并同时对自己动作的结果进行预期；在执行动作时，还要同时监控对方的行为反应，并根据双方的同步情况调整自己的运动和节奏感知，从而更好地与他人保持同步(Semin & Cacioppo, 2008; Su et al., 2020; Vesper et al., 2010)。由此可见，人际运动同步包含三大认知因素：时间感知、运动计划和运动执行。这些因素既制约着个体同步能力的发展，也影响着个体人际运动同步的表现。

3.2.1 时间感知和节奏感知(Timing Perception and Rhythm Perception)

要完成同步化行为，个体就需要保持内部节奏和外部刺激在时间上的协调一致(Provasi & Bobin-Bègue, 2003)。而在努力做到与刺激序列同步之前，个体要先具备感知刺激序列时间间隔及节奏模式的能力。

节奏感知是人从外界刺激的时间组织中提取出节奏特征的过程，它分为两个层面：一是对刺激序列中规律的组织方式的感知，例如音乐中的节拍(如 4/4 拍，以 4 拍为一个循环的组)；二是对等时性脉冲(isochronous pulse)的感知，如音乐中的固定速度(tempo)、跳舞或做体操的节拍式动作(潘禄, 2016; Patel, 2006)。个体节奏感知和时间感知的主流认知模型是时钟模型。该模型认为认知系统中存在着以节拍器和累积器为基础模块的内部时钟，其中节拍器以稳定的时间间隔发出信号，累积器则对节拍器所产生的信号进行数量上的累加，用以表征主观时间(潘禄, 2016)。根据这一理论模型，人对时间的准确估计依赖于人体内部的节奏振荡机制(潘禄, 2016; 万群 等, 2010)。节奏感知能力在同步行为中的作用主要体现在较好的节奏感知能力可以让个体对下一个节拍的到来产生准确的预期，并由此能较好地计划自身运动、保持与外部节奏的同步。

3.2.2 运动计划与运动预测(Motor Planning and Prediction)

在同步化运动过程中，如果个体感知到外部节奏刺激之后，再做出运动反应，其产生的运动一定会落后于节拍的时间点。这是因为感知觉信号传入中央神经系统，再由中枢发出神经指令控制运动，大概有 150 ms 的延时(Repp & Su, 2013)。因此个体要做到与外部节奏刺激的同步，不能先感知、再反应，必须要提前发出运动指令(例如按键的动作指令)来克服感知运动系统中的延迟，从而完成同步化行为(Kurgansky & Shupikova, 2011; Repp, 2005; Repp & Su, 2013)。这种对感知进行预期、并根据预期做出运动反应的机制可以用运动控制系统内模型(Internal Model)中的前馈模型(Forward Model)来解释(Blakemore & Decety, 2001; Wolpert & Ghahramani, 2000; Wolpert & Kawato, 1998)。即在下一个节拍来临之前，大脑发放运动指令拷贝(Efference Copy)、形成动作预期(Wolpert & Flanagan, 2001)，这个预期需要刚好将动作与下一个节拍在时间点上发生重叠。研究发现在同步化运动中，个体的预期不仅能克服感知运动系统所造成的滞后，还往往会使动作提前几十毫秒发生(Repp, 2005)。这种预期趋势(Anticipation Tendency)被称为负平均异步(Negative Mean Asynchrony) (Repp, 2005; Repp & Su, 2013)，即相

对于节拍点，动作反应发生的时间不是正值或零，而是一个负值。有研究认为负平均异步的发生是因为从大脑到耳朵的神经传导速度比大脑到手的传导速度更快(Aschersleben & Bertelson, 2003; Białuńska et al., 2011)，也有研究者认为是触觉和本体觉的感觉登记的速度比听觉慢带来的结果(Wohlschläger & Koch, 2000)。总之，预期是同步运动的核心特点之一，也是完成同步化行为的重要环节(Repp, 2005)。

儿童是否在较早时期就会发展出运动预期？一项针对 7~8 岁儿童和成人的视觉运动同步研究发现儿童早期就已发展出和成人相当的内模型机制来帮助他们有效适应环境(Kurgansky & Shupikova, 2011)。在该研究中，两组被试需要分别跟随 500~2000 ms 的视觉刺激做同步按键任务，该实验将同步行为分为起始阶段和同步阶段，起始阶段指的是从对视觉刺激做出反应到能够实现稳定同步之间的过渡。研究结果发现，7~8 岁儿童在起始阶段的同步适应曲线和成人类似，这意味着儿童此时已经具备和成人相当的内模型，能够对外部刺激的发生形成预期并提前做出反应(Kurgansky & Shupikova, 2011)。

当同步运动中同时存在着社会互动因素即人际运动同步时，个体不仅需要对外部刺激做出预测性反应，还需要在与同伴互动的过程中监视和预测对方的动作、并根据对方的动作反馈不断调整自身的行为(Meyer & Hunnius, 2020; Sebanz & Knoblich, 2021)。有研究发现儿童在人际协调(Interpersonal Coordination)过程中监测他人行为时，感觉运动区(镜像神经元)激活增加(Ménoret et al., 2014)。还有研究表明，婴儿的感觉运动系统不仅在监测时被激活，在预期他人的行为时也会被激活(Southgate et al., 2010; Stapel et al., 2010)。例如，9 个月大的婴儿在预期他人的目标导向行动时可以检测到运动神经的活动(Southgate et al., 2010)。一项 2.5 岁儿童的联合行动(Joint Action)研究证明了行动预测对人际协调成功的重要性(Meyer et al., 2015)，能够更准确的预测同伴运动的儿童，在人际协调的过程中会表现出更少的变异性。

3.2.3 运动执行和运动噪音(Motor Executing and Motor Noise)

在同步化运动中，运动计划(Motor Planning)的下一步是运动执行(Motor Executing)。但个体在执行运动指令的过程中会不可避免地产生运动噪音(Motor Noise) (Friston, 2010)，从而给同步运动带来额外的变异性。运动噪音的大小与神经元发放的变异性密切相关(Jones et al., 2002)。同时它还和肌肉纤维的变异性、感知外部世界的不确定性(Faisal et al., 2008; Wolpert, 2007)、运动幅度(Jones et al., 2002; van Beers, 2009)相关。运动的幅度和强度越大，肌肉发出的力量越强，其力量的变异性就会越大，运动噪音也会越大(Jones et al., 2002; van Beers, 2009)。

运动执行能力，特别是运动噪音，会影响同步运动的绩效。与成年人相比，儿童执行各种运动任务，如抓握(Kuhtz-Buschbeck et al., 1998)、肘部弯曲(Jansen-Osmann et al., 2002)和快速目标导向的手臂运动(Yan & Thomas, 2002)时，都表现出更大的运动变异性。因此，儿童人际运动同步中的不稳定性，很有可能和儿童的运动噪音过大相关。此外，由于儿童的运动控制能力和协调能力比较差，如果同步化运动的动作比较复杂，也会影响运动同步的表现。

综上，儿童人际运动同步的表现不仅受到运动方式、节奏刺激类型、同步对象等实验操控条件的影响，还受到时间感知、运动计划和运动执行三大认知因素的影响。在同步运动过程中，个体要想获得好的同步表现，既要有良好的时间感知和节奏感知能力，提前对自己的动作结果形成预期，还要在动作执行过程中尽量减少运动噪音，并能根据双方的同步情况及时做出调整。

4 人际运动同步的非典型发展

孤独症(Autism Spectrum Disorders, ASD)儿童的核心特征是社会互动缺陷和沟通障碍(American Psychiatric Association, 2013)，并伴发运动系统的异常表现(Fournier et al., 2010)。由于人际运动同步发生在人与人之间的互动沟通中，会对亲社会行为产生促进作用(Cirelli, 2018; Macpherson et al., 2020; Mogan et al., 2017; Rauchbauer & Grosbras, 2020; Rennung & Göritz, 2016)，因此近年来研究者们开始研究孤独症儿童的人际运动同步的行为表现及其影响因素，探索社会互动干预方案治疗儿童孤独症的可能性。

4.1 孤独症儿童人际运动同步困难的表现

与健康儿童相比，孤独症儿童的人际运动同

步呈现出非典型特点，即自发性同步水平较低，同步表现更差(Brezis et al., 2017; Fitzpatrick et al., 2016; Fitzpatrick et al., 2017; Kaur et al., 2018; Marsh et al., 2013) 。

例如，在和父母一起执行的同步运动任务摇椅子(rocking)中，与健康儿童相比，孤独症儿童参与其中、自发同步的水平较低(Fitzpatrick et al., 2016; Marsh et al., 2013)。同步摇手摆时，孤独症儿童的动作更滞后且更加不稳定(Marsh et al., 2013); 同步击鼓、拍手和行走时，孤独症儿童的同步准确率也更低(Fitzpatrick et al., 2017; Kaur et al., 2018)。值得注意的是，孤独症儿童人际运动同步的行为表现与他们孤独症症状的严重程度正相关，即症状严重的孤独症儿童，其人际运动同步的表现更差(Su et al., 2020)。

4.2 孤独症儿童人际运动同步困难的制约因素

为什么孤独症儿童会呈现出非典型的人际运动同步特点，他们的同步表现受到哪些制约因素的影响？有研究认为孤独症儿童很难将感觉信息的输入和动作输出在时间上做到同步，这和该群体的时间处理能力及运动执行能力有关(Bloch et al., 2019)。

首先，在时间感知和节奏感知方面，孤独症儿童具有非典型的时间加工特点，这对其人际运动同步有重要影响。有研究认为，时间处理包含运动时间(motor timing)和知觉时间(perceptual timing) (Isaksson et al., 2018)。研究发现在使用自由敲击键盘任务评估儿童的运动时间(motor timing)时，孤独症儿童的敲击速度要比健康儿童更快(Isaksson et al., 2018)。由于儿童运动同步的发展趋势是由快到慢、逐渐适应更慢节奏的过程，孤独症儿童对较快节奏的偏好体现了他们在同步行为发展上的滞后状态。另外，在秒下时间的同时辨别任务(simultaneity judgement)上，孤独症儿童的时间差别阈限要高于健康儿童(Isaksson et al., 2018)，这在孤独症成人群体中也得到了验证(Falter et al., 2012)。

其次，孤独症群体在运动计划与运动预测上反应时间更长(Gonzalez et al., 2013)，很可能因此影响到其运动同步的表现。在不同年龄段的孤独症儿童群体中，研究者们较为一致地发现他们在简单的目标导向抓取任务中反应时间的变异性比健康儿童更大(Dowd et al., 2012; Glazebrook et al., 2009; Glazebrook et al., 2006)。研究者们认为更长的反应时、更高的变异性反映了孤独症儿童在运动计划上的异常。另外，成功的人际协调任务需要参与者在运动计划过程中考虑对方的行为并根据对方的行为调整自己的行动(Bloch et al., 2019)。在物品传递合作任务中，孤独症患者更少评估和预期对方的抓握动作舒适度，抓握位置的变异性也更大(Gonzalez et al., 2013)。这种适应对方行为并根据对方动作自我调节的能力与孤独症患者症状呈正相关，即症状越严重，适应和调节能力越差(Curioni et al., 2017)。

最后，在运动执行方面，孤独症儿童的精细动作、粗大动作以及姿势控制等运动能力均受损，这一定程度上影响到了他们人际运动同步表现。动作笨拙是孤独症患者临床表现的一个主要特征(Ghaziuddin & Butler, 1998)。被诊断患有孤独症的人群中，约 80%存在运动障碍(Fournier et al., 2010; Pan et al., 2009)，他们在精细动作和粗大动作的运动协调、双手手臂的协调以及复杂动作的执行上都有困难(Isenhower et al., 2012; Jansiewicz et al., 2006; Minshew et al., 2004; Mostofsky et al., 2006)。孤独症群体用于运动计划和预测的感觉输入整合能力较差，运动输出具有不稳定性，运动噪音更大(Gowen & Hamilton, 2013)。而对于孤独症儿童，研究发现他们有明显的快速运动(Anzulewicz et al., 2016)、急促而不流畅的肢体动作(Cook et al., 2013)、非典型步态(Dufek et al., 2017; Eggleston et al., 2018; Gong et al., 2020)、姿势摇摆(Doumas et al., 2016)以及动作输出不稳定性(Kaur et al., 2018; Parma & de Marchena, 2016)。

综上，人际运动同步能够促进亲社会行为，但孤独症儿童这一特殊群体在同步化运动上存在困难。因此，探究孤独症儿童人际运动同步表现并发现背后的制约因素显得尤为重要。时间处理的缺陷以及运动系统的异常可能是该群体人际运动同步困难的潜在制约因素。有研究认为，孤独症儿童运动同步上的异常表现会影响其社交能力的发展(Bloch et al., 2019; Casartelli et al., 2016; Gallese et al., 2013)。在日常交往过程中，人们在和他人互动时往往会保持时间上默契和协调、动作上的同步，这也会促进双方社交关系的发展。如果孤独症儿童在早期就无法做到和他人在动作上的协调一致，这也很可能影响到他们后续社交

能力的发展。

5　总结与展望

本文聚焦儿童人际运动同步的发展过程和影响因素，并对孤独症儿童人际运动同步的研究进行了梳理。综合以往的文献，我们发现健康儿童的人际运动同步能力随着年龄的增长不断提升，其表现会受到运动方式、节奏刺激类型、同步对象的影响，以及时间感知、运动计划和运动执行三大认知因素的制约。孤独症儿童时间处理呈现非典型加工的特点，加上运动能力受损，从而影响他们人际运动同步的表现。

人际运动同步是日常社会互动中非常重要的一部分，在儿童发展的过程中有其特有的规律。如果儿童从出生开始就缺乏人际互动，可能导致他们未来社会和情感发展困难，并影响儿童自我调节以及建立亲密关系的能力(Feldman, 2007)。因此，儿童人际运动同步的相关研究显得极为重要。通过文献的综述，人际运动同步在儿童发展领域，还有三方面亟待进一步研究。

首先，已有的研究表明，儿童很早就发展出相当的节奏感知能力(Baruch & Drake, 1997; Hannon & Johnson, 2005)。那为什么儿童在有意识的参与击鼓、舞蹈等人际运动同步时，要经过好几年的时间发展才能达到成人水平？很大程度上，这可能和儿童的运动控制系统发育相对滞后有关(Trainor & Cirelli, 2015)。也就是说，运动能力发展受限，影响到儿童人际运动同步的表现。但目前还没有看到有关运动影响儿童同步表现的相关研究，需要进一步的探究。此外，儿童人际运动同步与非人际运动同步的发展轨迹是否完全相等，也值得进一步的探讨。

其次，对于健康儿童来说，其人际运动同步的表现比非人际同步表现更好，原因可能是儿童和人一起做同步化运动更能激发他们的内在动机(Kirschner & Tomasello, 2009)。但这一表现，在孤独症儿童身上结果正好相反。有研究表明孤独症儿童与人一起击鼓时的表现比单独击鼓时的表现更差(Yoo & Kim, 2018)。这背后的原因到底是什么？是因为孤独症儿童人际运动同步时的社会动机不足，还是因为他们的运动控制本身就存在困难有待进一步研究。另外，孤独症儿童的社交互动缺陷通常可以归因于整个发育过程中的连续性恶化，但也有研究假设认为孤独症儿童社交能力缺陷可以归因于儿童早期的运动系统发育的滞后，因而影响到他们参与未来的社交活动(Casartelli et al., 2016; Gallese et al., 2013)。对这一问题的探究有助于我们了解孤独症儿童社交发育障碍的原因，进而发展潜在的社交干预疗法。

最后，人际运动同步对于健康儿童社交能力和亲社会行为有促进作用，但这一结果在孤独症群体中的研究结果不一致，有研究表明人际运动同步的干预措施对社交和亲社会行为有促进作用(Koehne et al., 2016)。另一些研究发现并没有显著变化(Landa et al., 2011)，例如 2~3 岁的孤独症儿童在接受人际运动同步的干预措施后，虽然在模仿任务上表现更好，但联合注意和社交情感并没有显著增加(Landa et al., 2011)。针对孤独症成人患者的研究结果也表明，尽管他们在同步行为上有所改善，但干预前后同理心的表现并未显著变化(Koehne et al., 2016)。人际运动同步在孤独症群体的干预效果并不理想的原因还需要进一步探究。未来的研究需要进一步细化干预措施的影响，如干预手段有没有考虑到孤独症儿童的运动能力，干预的节奏速度是否在儿童承受的范围之内，干预的持续时间和同步刺激类型的选择等。只有对这些具体的影响因素进行更精细的研究，才能更好地发挥人际运动同步在孤独症儿童当中的作用。

参考文献

潘禄. (2016). *肢体同步运动对节奏感知中注意同步化的影响* (博士学位论文). 浙江大学, 杭州.

万群, 林苗, 钱秀莹. (2010). 时间知觉的脑机制: 时钟模型的困境和新导向. *心理科学进展*, *18*, 394–402.

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5)* (5th ed.). Washington, DC: American Psychiatric Publishing.

Anzulewicz, A., Sobota, K., & Delafield-Butt, J. T. (2016). Toward the autism motor signature: Gesture patterns during smart tablet gameplay identify children with autism. *Scientific Reports*, *6*, 1–13.

Aschersleben, G., & Bertelson, P. (2003). Temporal ventriloquism: Crossmodal interaction on the time dimension: 2. Evidence from sensorimotor synchronization. *International Journal of Psychophysiology*, *50*, 157–163.

Aschersleben, G., & Prinz, W. (1995). Synchronizing actions with events: The role of sensory information. *Perception and Psychophysics*, *57*, 305–317.

Baruch, C., & Drake, C. (1997). Tempo discrimination in infants. *Infant Behavior and Development*, *20*, 573–577.

Bernieri, F. J., Reznick, J. S., & Rosenthal, R. (1988). Synchrony, pseudosynchrony, and dissynchrony: Measuring the entrainment process in mother-infant interactions. *Journal of Personality and Social Psychology*, *54*, 243.

Białuńska, A., Dalla Bella, S., & Jaśkowski, P. (2011). Increasing stimulus intensity does not affect sensorimotor synchronization. *Psychological Research*, *75*, 43–53.

Blakemore, S.-J., & Decety, J. (2001). From the perception of action to the understanding of intention. *Nature Reviews Neuroscience*, *2*, 561–567.

Bloch, C., Vogeley, K., Georgescu, A. L., & Falter-Wagner, C. M. (2019). Intrapersonal synchrony as constituent of interpersonal synchrony and its relevance for autism spectrum disorder. *Frontiers in Robotics and AI*, *6*, 73.

Brezis, R.-S., Noy, L., Alony, T., Gotlieb, R., Cohen, R., Golland, Y., & Levit-Binnun, N. (2017). Patterns of joint improvisation in adults with autism spectrum disorder. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1790.

Brown, S. (2000). Evolutionary models of music: From sexual selection to group selection. In François Tonneau, & Nicholas S. Thompson (Eds.), *Perspectives in Ethology* (pp. 231–281). Boston, American: Springer US.

Carson, R. G., Yalchin, O., Stephan, R., & Jan, L. (2009). Artificial gravity reveals that economy of action determines the stability of sensorimotor coordination. *Plos One*, *4*(4), e5248–. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005248

Casartelli, L., Molteni, M., & Ronconi, L. (2016). So close yet so far: Motor anomalies impacting on social functioning in autism spectrum disorder. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *63*, 98–105.

Cirelli, L. K. (2018). How interpersonal synchrony facilitates early prosocial behavior. *Current Opinion in Psychology*, *20*, 35–39.

Cirelli, L. K., Einarson, K. M., & Trainor, L. J. (2014). Interpersonal synchrony increases prosocial behavior in infants. *Developmental Science*, *17*, 1003–1011.

Clizbe, D., & Getchell, N. (2010). The development of period correction processes in motor coordination: Adaptation to temporal perturbation. *Motor Control*, *14*, 59–67.

Cook, J. L., Blakemore, S.-J., & Press, C. (2013). Atypical basic movement kinematics in autism spectrum conditions. *Brain*, *136*, 2816–2824.

Cross, L., Turgeon, M., & Atherton, G. (2019). How moving together binds us together: The social consequences of interpersonal entrainment and group processes. *Open Psychology*, *1*, 273–302.

Cuadros, Z., Hurtado, E., & Cornejo, C. (2020). Infant-adult synchrony in spontaneous and nonspontaneous interactions. *Plos One*, *15*(12), e0244138. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244138

Curioni, A., Minio-Paluello, I., Sacheli, L. M., Candidi, M., & Aglioti, S. M. (2017). Autistic traits affect interpersonal motor coordination by modulating strategic use of role-based behavior. *Molecular Autism*, *8*, 1–13.

Dahan, A., Noy, L., Hart, Y., Mayo, A., & Alon, U. (2016). Exit from synchrony in joint improvised motion. *Plos One*, *11*(10), e0160747. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160747

Doumas, M., McKenna, R., & Murphy, B. (2016). Postural control deficits in autism spectrum disorder: The role of sensory integration. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *46*, 853–861.

Dowd, A. M., McGinley, J. L., Taffe, J. R., & Rinehart, N. J. (2012). Do planning and visual integration difficulties underpin motor dysfunction in autism? A kinematic study of young children with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *42*, 1539–1548.

Drake, C., Jones, M. R., & Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: Attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, *77*, 251–288.

Dufek, J. S., Eggleston, J. D., Harry, J. R., & Hickman, R. A. (2017). A comparative evaluation of gait between children with autism and typically developing matched controls. *Medical Sciences*, *5*, 1.

Eggleston, J. D., Landers, M. R., Bates, B. T., Nagelhout, E., & Dufek, J. S. (2018). Examination of gait parameters during perturbed over-ground walking in children with autism spectrum disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *74*, 50–56.

Endedijk, H. M., Ramenzoni, V. C., Cox, R. F., Cillessen, A. H., Bekkering, H., & Hunnius, S. (2015). Development of interpersonal coordination between peers during a drumming task. *Developmental Psychology*, *51*, 714.

Faisal, A. A., Selen, L. P., & Wolpert, D. M. (2008). Noise in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*, 292–303.

Falter, C. M., Noreika, V., Wearden, J. H., & Bailey, A. J. (2012). More consistent, yet less sensitive: Interval timing in autism spectrum disorders. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *65*, 2093–2107.

Feldman, R. (2007). Mother-infant synchrony and the development of moral orientation in childhood and adolescence: Direct and indirect mechanisms of developmental continuity. *American Journal of Orthopsychiatry*, *77*, 582–597.

Feniger-Schaal, R., Schoenherr, D., Altmann, U., & Strauss, B. (2021). Movement synchrony in the mirror game. *Journal of Nonverbal Behavior*, *45*, 107–126.

Fitzpatrick, P., Frazier, J. A., Cochran, D. M., Mitchell, T.,

Coleman, C., & Schmidt, R. (2016). Impairments of social motor synchrony evident in autism spectrum disorder. *Frontiers in Psychology*, *7*, 1323.

Fitzpatrick, P., Romero, V., Amaral, J. L., Duncan, A., Barnard, H., Richardson, M. J., & Schmidt, R. C. (2017). Evaluating the importance of social motor synchronization and motor skill for understanding autism. *Autism Research*, *10*, 1687–1699.

Fitzpatrick, P., Schmidt, R., & Lockman, J. J. (1996). Dynamical patterns in the development of clapping. *Child Development*, *67*, 2691–2708.

Fournier, K. A., Hass, C. J., Naik, S. K., Lodha, N., & Cauraugh, J. H. (2010). Motor coordination in autism spectrum disorders: A synthesis and meta-analysis. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *40*, 1227–1240.

Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, *11*, 127–138.

Fujii, S., Hirashima, M., Kudo, K., Ohtsuki, T., Nakamura, Y., & Oda, S. (2011). Synchronization error of drum kit playing with a metronome at different tempi by professional drummers. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, *28*, 491–503.

Gallese, V., Rochat, M. J., & Berchio, C. (2013). The mirror mechanism and its potential role in autism spectrum disorder. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *55*, 15–22.

Getchell, N. (2007). Developmental aspects of perception-action coupling in multi-limb coordination: Rhythmic sensorimotor synchronization. *Motor Control*, *11*, 1.

Ghaziuddin, M., & Butler, E. (1998). Clumsiness in autism and Asperger syndrome: A further report. *Journal of Intellectual Disability Research*, *42*, 43–48.

Glazebrook, C. M., Elliott, D., & Lyons, J. (2006). A kinematic analysis of how young adults with and without autism plan and control goal-directed movements. *Motor Control*, *10*, 244–264.

Glazebrook, C. M., Gonzalez, D., Hansen, S., & Elliott, D. (2009). The role of vision for online control of manual aiming movements in persons with autism spectrum disorders. *Autism*, *13*, 411–433.

Glenberg, A. M., Mann, S., Altman, L., Forman, T., & Procise, S. (1989). Modality effects in the coding reproduction of rhythms. *Memory and Cognition*, *17*, 373–383.

Gong, L., Liu, Y., Yi, L., Fang, J., Yang, Y., & Wei, K. (2020). Abnormal gait patterns in autism spectrum disorder and their correlations with social impairments. *Autism Research*, *13*, 1215–1226.

Gonzalez, D. A., Glazebrook, C. M., Studenka, B., & Lyons, J. (2013). Motor interactions with another person: Do individuals with Autism Spectrum Disorder plan ahead? *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *7*, 23.

Gowen, E., & Hamilton, A. (2013). Motor abilities in autism: A review using a computational context. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *43*, 323–344.

Hagen, E. H., & Bryant, G. A. (2003). Music and dance as a coalition signaling system. *Human Nature*, *14*, 21.

Hannon, E. E., & Johnson, S. P. (2005). Infants use meter to categorize rhythms and melodies: Implications for musical structure learning. *Cognitive Psychology*, *50*, 354–377.

Hoehl, S., Fairhurst, M., & Schirmer, A. (2021). Interactional synchrony: Signals, mechanisms and benefits. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *16*, 5–18.

Hove, M. J., Keller, P. E., & Krumhansl, C. L. (2007). Sensorimotor synchronization with chords containing tone-onset asynchronies. *Perception and Psychophysics*, *69*, 699–708.

Hove, M. J., & Risen, J. L. (2009). It's all in the timing: Interpersonal synchrony increases affiliation. *Social Cognition*, *27*, 949–960.

Hove, M. J., Spivey, M. J., & Krumhansl, C. L. (2010). Compatibility of motion facilitates visuomotor synchronization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *36*, 1525.

Hu, Y., Hu, Y., Li, X., Pan, Y., & Cheng, X. (2017). Brain-to-brain synchronization across two persons predicts mutual prosociality. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *12*, 1835–1844.

Isaksson, S., Salomäki, S., Tuominen, J., Arstila, V., Falter-Wagner, C. M., & Noreika, V. (2018). Is there a generalized timing impairment in Autism Spectrum Disorders across time scales and paradigms? *Journal of Psychiatric Research*, *99*, 111–121.

Isenhower, R. W., Marsh, K. L., Richardson, M. J., Helt, M., Schmidt, R., & Fein, D. (2012). Rhythmic bimanual coordination is impaired in young children with autism spectrum disorder. *Research in Autism Spectrum Disorders*, *6*, 25–31.

Jansen-Osmann, P., Richter, S., Konczak, J., & Kalveram, K.-T. (2002). Force adaptation transfers to untrained workspace regions in children. *Experimental Brain Research*, *143*, 212–220.

Jansiewicz, E. M., Goldberg, M. C., Newschaffer, C. J., Denckla, M. B., Landa, R., & Mostofsky, S. H. (2006). Motor signs distinguish children with high functioning autism and Asperger's syndrome from controls. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *36*, 613–621.

Jones, K. E., Hamilton, A. F. d. C., & Wolpert, D. M. (2002). Sources of signal-dependent noise during isometric force production. *Journal of Neurophysiology*, *88*, 1533–1544.

Kaur, M., Srinivasan, S. M., & Bhat, A. N. (2018). Comparing

motor performance, praxis, coordination, and interpersonal synchrony between children with and without Autism Spectrum Disorder (ASD). *Research in Developmental Disabilities*, *72*, 79–95.

Kirschner, S., & Tomasello, M. (2009). Joint drumming: Social context facilitates synchronization in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *102*, 299–314.

Kleinspehn-Ammerlahn, A., Riediger, M., Schmiedek, F., von Oertzen, T., Li, S.-C., & Lindenberger, U. (2011). Dyadic drumming across the lifespan reveals a zone of proximal development in children. *Developmental Psychology*, *47*, 632.

Koehne, S., Hatri, A., Cacioppo, J. T., & Dziobek, I. (2016). Perceived interpersonal synchrony increases empathy: Insights from autism spectrum disorder. *Cognition*, *146*, 8–15.

Konvalinka, I., Vuust, P., Roepstorff, A., & Frith, C. D. (2010). Follow you, follow me: Continuous mutual prediction and adaptation in joint tapping. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *63*, 2220–2230.

Kragness, H. E., & Cirelli, L. K. (2021). A syncing feeling: Reductions in physiological arousal in response to observed social synchrony. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *16*, 177–184.

Kuhtz-Buschbeck, J., Stolze, H., Boczek-Funcke, A., Jöhnk, K., Heinrichs, H., & Illert, M. (1998). Kinematic analysis of prehension movements in children. *Behavioural Brain Research*, *93*, 131–141.

Kurgansky, A., & Shupikova, E. (2011). Visuomotor synchronization in adults and seven-to eight-year-old children. *Human Physiology*, *37*, 526–536.

Landa, R. J., Holman, K. C., O'Neill, A. H., & Stuart, E. A. (2011). Intervention targeting development of socially synchronous engagement in toddlers with autism spectrum disorder: A randomized controlled trial. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *52*, 13–21.

Launay, J., Dean, R. T., & Bailes, F. (2013). Synchronization can influence trust following virtual interaction. In Andreas B. Eder & Christian Frings (Eds.), *Experimental psychology* (pp. 53–63). Hogrefe.

Launay, J., Tarr, B., & Dunbar, R. I. (2016). Synchrony as an adaptive mechanism for large‐scale human social bonding. *Ethology*, *122*, 779–789.

Lorås, H., Sigmundsson, H., Talcott, J., Öhberg, F., & Stensdotter, A. (2012). Timing continuous or discontinuous movements across effectors specified by different pacing modalities and intervals. *Experimental Brain Research*, *220*, 335–347.

Macpherson, M., Fay, N., & Miles, L. (2020). Seeing synchrony: A replication of the effects of task-irrelevant social information on perceptions of interpersonal coordination. *Acta Psychologica*, *209*, 103–140.

Madison, G., Karampela, O., Ullén, F., & Holm, L. (2013). Effects of practice on variability in an isochronous serial interval production task: Asymptotical levels of tapping variability after training are similar to those of musicians. *Acta Psychologica*, *143*, 119–128.

Manning, F. C., Harris, J., & Schutz, M. (2016). Temporal prediction abilities are mediated by motor effector and rhythmic expertise. *Experimental Brain Research*, *235*, 1–11.

Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Richardson, M. J., Helt, M., Verbalis, A. D., Schmidt, R. C., & Fein, D. (2013). Autism and social disconnection in interpersonal rocking. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, *7*, 4.

McAuley, J. D., Jones, M. R., Holub, S., Johnston, H. M., & Miller, N. S. (2006). The time of our lives: Life span development of timing and event tracking. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*, 348.

Ménoret, M., Varnet, L., Fargier, R., Cheylus, A., Curie, A., des Portes, V., Nazir, T. A., & Paulignan, Y. (2014). Neural correlates of non-verbal social interactions: A dual-EEG study. *Neuropsychologia*, *55*, 85–97.

Meyer, M., Bekkering, H., Haartsen, R., Stapel, J., & Hunnius, S. (2015). The role of action prediction and inhibitory control for joint action coordination in toddlers. *Journal of Experimental Child Psychology*, *139*, 203–220.

Meyer, M., Bekkering, H., Paulus, M., & Hunnius, S. (2010). Joint action coordination in 2½-and 3-year-old children. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*, 220.

Meyer, M., & Hunnius, S. (2020). Becoming better together: The early development of interpersonal coordination. *New Perspectives on Early Social-Cognitive Development*, *254*, 187.

Mills, P. F., Harry, B., Stevens, C. J., Knoblich, G., & Keller, P. E. (2019). Intentionality of a co-actor influences sensorimotor synchronisation with a virtual partner. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *72*, 1478–1492.

Minshew, N. J., Sung, K., Jones, B. L., & Furman, J. M. (2004). Underdevelopment of the postural control system in autism. *Neurology*, *63*, 2056–2061.

Mogan, R., Fischer, R., & Bulbulia, J. A. (2017). To be in synchrony or not? A meta-analysis of synchrony's effects on behavior, perception, cognition and affect. *Journal of Experimental Social Psychology*, *72*, 13–20.

Mostofsky, S. H., Dubey, P., Jerath, V. K., Jansiewicz, E. M., Goldberg, M. C., & Denckla, M. B. (2006). Developmental dyspraxia is not limited to imitation in children with autism spectrum disorders. *Journal of the International Neuropsychological Society*, *12*, 314.

Mu, Y., Huang, Y., Ji, C., Gu, L., & Wu, X. (2018). Auditory over visual advantage of sensorimotor synchronization in

6-to 7-year-old children but not in 12-to 15-year-old children and adults. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *44*, 818.

Pan, C.-Y., Tsai, C.-L., & Chu, C.-H. (2009). Fundamental movement skills in children diagnosed with autism spectrum disorders and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, *39*, 1694.

Parma, V., & de Marchena, A. B. (2016). Motor signatures in autism spectrum disorder: The importance of variability. In Jan-Marino Ramirez. In Jan-Marino (Eds.), *Journal of neurophysiology* (pp. 1081–1748). The American Physiological Society.

Patel, A. D. (2006). Musical rhythm, linguistic rhythm, and human evolution. *Music Perception*, *24*, 99–104.

Provasi, J., & Bobin-Bègue, A. (2003). Spontaneous motor tempo and rhythmical synchronisation in 2½-and 4-year-old children. *International Journal of Behavioral Development*, *27*, 220–231.

Rabinowitch, T.-C., & Knafo-Noam, A. (2015). Synchronous rhythmic interaction enhances children's perceived similarity and closeness towards each other. *Plos One*, *10*(4), e0120878. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120878

Rabinowitch, T.-C., & Meltzoff, A. N. (2017). Synchronized movement experience enhances peer cooperation in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *160*, 21–32.

Rauchbauer, B., & Grosbras, M.-H. (2020). Developmental trajectory of interpersonal motor alignment: Positive social effects and link to social cognition. In Giovanni Laviola, S. Chamberlain & E. Choleris (Eds.), *Neuroscience and biobehavioral reviews* (pp. 411–425). Elsevier.

Reddish, P., Fischer, R., & Bulbulia, J. (2013). Let's dance together: Synchrony, shared intentionality and cooperation. *Plos One*, *8*(8), e71182–e71182. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071182

Rennung, M., & Göritz, A. S. (2016). Prosocial consequences of interpersonal synchrony. In Edgar Erdfelder (Eds.), *Hotspots in psychology* (pp. 168–189). Hogrefe Publishing.

Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: A review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin and Review*, *12*, 969–992.

Repp, B. H., & Penel, A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological Research*, *68*, 252–270.

Repp, B. H., & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: A review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin and Review*, *20*, 403–452.

Rose, P. (2016). Effects of movement, tempo, and gender on steady beat performance of kindergarten children. *International Journal of Music Education*, *34*, 104–115.

Sebanz, N., & Knoblich, G. (2021). Progress in joint-action research. *Current Directions in Psychological Science*, *30*, 138–143.

Semin, G. R., & Cacioppo, J. T. (2008). From embodied representation to co-regulation. In Pineda J. A. (Eds), *Mirror neuron systems* (pp. 107–120). Humana Press.

Shamay-Tsoory, S. G., Saporta, N., Marton-Alper, I. Z., & Gvirts, H. Z. (2019). Herding brains: A core neural mechanism for social alignment. *Trends in Cognitive Sciences*, *23*, 174–186.

Southgate, V., Johnson, M. H., Karoui, I. E., & Csibra, G. (2010). Motor system activation reveals infants' on-line prediction of others' goals. *Psychological Science*, *21*, 355–359.

Stapel, J. C., Hunnius, S., van Elk, M., & Bekkering, H. (2010). Motor activation during observation of unusual versus ordinary actions in infancy. *Social Neuroscience*, *5*, 451–460.

Studenka, B. E., & Zelaznik, H. N. (2008). The influence of dominant versus non-dominant hand on event and emergent motor timing. *Human Movement Science*, *27*, 29–52.

Su, W.-C., Culotta, M., Mueller, J., Tsuzuki, D., Pelphrey, K., & Bhat, A. (2020). Differences in cortical activation patterns during action observation, action execution, and interpersonal synchrony between children with or without Autism Spectrum Disorder (ASD): An fNIRS pilot study. *Plos One*, *15*(10), e0240301. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240301

Tarr, B., Launay, J., & Dunbar, R. I. (2016). Silent disco: Dancing in synchrony leads to elevated pain thresholds and social closeness. *Evolution and Human Behavior*, *37*, 343–349.

Toiviainen, P., Luck, G., & Thompson, M. R. (2010). Embodied meter: Hierarchical eigenmodes in music-induced movement. *Music Perception*, *28*, 59–70.

Trainor, L. J., & Cirelli, L. (2015). Rhythm and interpersonal synchrony in early social development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1337*, 45–52.

Tranchant, P., Vuvan, D. T., & Peretz, I. (2016). Keeping the beat: A large sample study of bouncing and clapping to music. *Plos One*, *11*(7), e0160178. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160178

Tsapakidou, A., Zachopoulou, E., & Gini, V. (2001). Complexity of rhythmic ability as measured in preschool children. *Perceptual and Motor Skills*, *92*, 777–785.

Tunçgenç, B., Cohen, E., & Fawcett, C. (2015). Rock with me: The role of movement synchrony in infants' social and nonsocial choices. *Child Development*, *86*, 976–984.

Valdesolo, P., & Desteno, D. (2011). Synchrony and the social tuning of compassion. *Emotion*, *11*, 262–266.

van Beers, R. J. (2009). Motor learning is optimally tuned to

the properties of motor noise. *Neuron*, *63*, 406–417.

Vesper, C., Butterfill, S., Knoblich, G., & Sebanz, N. (2010). A minimal architecture for joint action. *Neural Networks*, *23*, 998–1003.

Vicaria, I. M., & Dickens, L. (2016). Meta-analyses of the intra-and interpersonal outcomes of interpersonal coordination. *Journal of Nonverbal Behavior*, *40*, 335–361.

Wiltermuth, S. S., & Heath, C. (2009). Synchrony and cooperation. *Psychological Science*, *20*, 1–5.

Wohlschläger, A., & Koch, R. (2000). Synchronization error: An error in time perception. In P. Desain, & L. Windsor (Eds.), *Rhythm perception and production* (pp. 115–127). Lisse: Swets.

Wolpert, D. M. (2007). Probabilistic models in human sensorimotor control. *Human Movement Science*, *26*, 511–524.

Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current Biology*, *11*, 729–732.

Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, *3*, 1212–1217.

Wolpert, D. M., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, *11*, 1317–1329.

Yan, J. H., & Thomas, J. R. (2002). Arm movement control: Differences between children with and without attention deficit hyperactivity disorder. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *73*, 10–18.

Yoo, G. E., & Kim, S. J. (2018). Dyadic drum playing and social skills: Implications for rhythm-mediated intervention for children with autism spectrum disorder. *Journal of Music Therapy*, *55*, 340–375.

Yu, L., & Myowa, M. (2021). The early development of tempo adjustment and synchronization during joint drumming: A study of 18-to 42-month-old children. In Bremner Gavin (Eds.), *Infancy* (pp.533–659). Wiley.

Zentner, M., & Eerola, T. (2010). Rhythmic engagement with music in infancy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *107*, 5768–5773.

Interpersonal motor synchronization in children

ZHANG Linlin[1,2], WEI Kunlin[3], LI Jing[1,2]

([1] *CAS Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*)

([2] *Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

([3] *School of Psychological and Cognitive Sciences, Peking University, Beijing* 100080, *China*)

Abstract: Interpersonal motor synchronization is a form of "social glue", which could promotes children to generate prosocial behaviors. The ability for children to synchronize motor interpersonally gradually improves across the developmental process. Their performance could be affected by various factors, such as the movement pattern, the rhythmic of the stimuli, and whom they synchronize with. In the process of interpersonal motor synchronization, it consists of three cognitive components: time perception, motor planning, and motor execution. Interpersonal motor synchronization affects both the development of individual synchronization ability and subsequent performance. In addition, children with autism spectrum disorder, a neurodevelopmental disorder, usually show abnormal behavior in interpersonal motor synchronization. For this reason, future research should not be limited to the exploration of the underlying mechanism of the abnormal interpersonal motor synchronization on children with autism, but also pay more attention to the intervention effect of the interpersonal synchronization training.

Key words: interpersonal motor synchronization, prosocial, cognitive mechanism, autism spectrum disorders